中華農業氣象(Chinese J. Agromet.) 3(3): 131-140, 1996

研究報告 (Original paper)

輻射光譜及紅外線熱像檢測大豆及落花生對人工模擬酸雨之徵狀反應

蘇慕容[1] 楊純明[1]

臺灣省農業試驗所農藝系作物逆境研究室

摘　要

本試驗目的旨在探討利用光譜層析輻射儀(spectroradiometer)，及紅外線熱像輻射儀(infrared imaging radiometer)，檢測落花生及大豆對人工模擬酸雨處理之徵狀反應的可行性，以取得非破壞性的結果，並以作爲將來研究其他作物不同逆境反應的前行參考及檢測技術。試驗以盆栽方式栽植落花生及大豆，在作物植冠建立後，分別給予人工模擬酸雨及自來水對照處理再行測定，另以完全不處理爲第二對照。試驗結果在光譜層析輻射檢測方面，落花生及大豆對人工模擬酸雨處理所呈現的光譜反射比，在近紅外光波段有較明顯的差別，最大可達7%；在可見光的部分則差距不明顯。顯然兩種參試作物在酸雨逆境下，植冠反射光譜的改變主要在於近紅外光波段。在紅外線熱像檢測方面，落花生及大豆分別經過12天及5天的人工模擬酸雨處理後，植冠平均溫度較自來水處理分別升高1.0℃及0.4℃。由上述結果，顯然酸雨淋洗過程中，酸性物質已對作物的組織結構及生理作用造成改變，此一特點亦可利用於判斷其他環境逆境之依據。

關鍵詞： 輻射光譜，熱像，人工模擬酸雨，落花生，大豆。

Changes of Spectral Reflectance and Infrared Thermal Image of Soybean and Peanut in Response to Simulated Acid Rain

Muh-Rong Su and Chwen-Ming Yang (Crop Stress Laboratory, Department of Agronomy, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan, ROC)

ABSTRACT: Potted experiments were conducted at Taiwan Agricultural Research Institute to study the changes of spectral reflectance and infrared thermal image of soybean and peanut in response to simulated acid rain. Measurements were taken after the establishment of plant canopy and during the treatments. Tape water shower and untreated plants were used as checks for comparison. Results indicated a significant difference in near infrared band of the reflected radiation of plant canopy in both species after exposed to simulated acid rain. By infrared thermal imaging analyses, it showed that the average temperature of peanut canopy of acid rain-treated plants was 1.0 °C higher than tape water-treated ones after 12-d treatment. It was 0.4 ℃ higher in acid rain-treated soybean after 5-d treatment. As shown, changes of spectral relectance and infrared thermal image can be used in assistance of discriminating of acid rain effect.

Key words: Spectral reflectance, Thermal image, Simulated acid rain, Peanut, Soybean.

收到稿件(Received)：11 May. 1996.　接受刊登(Accepted)：2 Jun. 1996.

1. 臺灣省農業試驗所農藝系助理及副研究員

前　言

以往對於作物受害的判別，常仰賴生長性狀調查、植株組織器官外表徵狀受害率、生理反應不正常、生化活性(酵素)分析與產量變化等。此等步驟繁雜，效率遲緩，倘能建立快速的田間實測且不破壞植體的方法，對於檢測效率將可大幅提升。遙感探測即具有快速取得大面積資料特性，且為非破壞性取樣，可以部分解決上述問題，而獲得作物受害的判別依據。

輻射光譜及紅外線熱像技術均為遙感探測方法之一。輻射光譜的應用，主要依植冠對不同波段光輻射的吸收率、反射率及穿透率差別性，光輻射範圍可以由紫外光、可見光至紅外光不等。健康的植株可強烈反射日射中的近紅外光，當植物受害後，此波段的反射量會依受害程度而減少，此特性已被用於判斷植株遭受病蟲害、水害、旱害、風害、霜害、空污傷害等逆境的影響(李，1995; 申，1996)。

許多生物學的過程與溫度有極密切關係，因此溫度測計為植物發育的重要診斷工具。在農業上的應用，例如乾旱造成作物植株溫度的改變(Blum, 1980)、灌溉時期與評估蒸發散量(Clawson and Blad, 1982; Hatfield *et al.*, 1983)及水分利用特性之育種品系選拔(Mtui *et al.*, 1981)等，均係應用作物植體溫度對環境反應而上升或下降的性質。此外，無論是病、蟲害感染作物植株後引發的組織色變與溫度的升降，植物生理的熱傳導，或是某種逆境狀況引起作物族群大規模的溫度變異，均可以非接觸式紅外線熱像技術進行探討、研究，獲得非破壞性的試驗結果(楊，1992)。紅外線熱像輻射儀之原理在於受測物輻射能量的傳輸，據此輻射能量推估實際溫度。測定植冠(plant canopy)時，亦有可能透過葉片之間的細空隙而包含土壤的輻射熱，利用熱像圖譜則可區分植冠與土壤的輻射熱，並可瞭解不同葉齡溫度之差異(Fuchs, 1990)。

在酸雨忍受程度上，大豆是屬於較敏感的作物(Irving, 1983)，雖然目前的酸雨對於大豆的生長、產量並未明顯造成重大的停滯及減產(Irving and Miller, 1981; Smith *et al.*, 1991; Reddy, 1989)，但對於外表徵狀(主要是葉片)卻有一定程度的傷害(Evan and Curry, 1979; Dubay and Heagle, 1987)。落花生在空氣污染研究中，是一種極佳的指標作物，對酸雨亦為敏感性作物(姚等， 1996)。因此，本試驗嘗試利用光譜層析輻射儀(spectroradiometer)及紅外線熱像輻射儀(infrared imaging radiometer)，檢測大豆及落花生對人工模擬酸雨處理的徵狀反應，以作為將來其他作物不同逆境反應的前行參考及檢測技術。

材料與方法

本研究試驗材料為大豆高雄三號(*Glycine max* L. cv. Kaohsiung 3)及落花生臺南十一號(*Arachis hypogaea* L. cv. Tainan 11)，分別種植於方盆(58 × 36 × 16 cm)之中，栽培介質為坋質壤土(clay 22 %, silt 52 %, sand 26 %)，酸鹼值6.56。兩作物各三盆，每盆種植15株，置於簡易溫室內。生育初期以自來水澆注，俟植冠已完全覆蓋盆土之後，三方盆分別進行人工模擬酸雨及自來水對照處理，另以完全不處理為第二對照。

人工模擬酸雨係以硫酸及硝酸340 mg l^{-1} : 85 mg l^{-1}(SO_4^{-2} : NO_3^{-1} = 4 : 1)混以自來水，pH介於2.6～2.8，電導度值(electrical conductivity, EC)範圍為12.0～14.5 S m^{-1}。對照溶液為自來水，pH值介於6.9～7.3，EC值介於2.7～3.2 S m^{-1}。酸雨淋洗流速為7.13 l m^{-2} min^{-1}，每天每次淋洗時間40分鐘，淋洗量約為600 l，淋洗處理於當地時間10:00～12:00之間實施，大豆總計處理9天，落花生則處理12天。

自人工模擬酸雨處理起始日起，每日於盆栽作物葉片表面乾燥後測定輻射光譜。為避免作物反射曲線受太陽入射角的影響，光譜層析輻射儀(model LI-1800及 remote cosine receptor, model LI-

1800-11, LI-COR Inc., USA)係於13:00～13:30測定作物植冠反射頻譜及當時入射日射頻譜各三次，測量高度約距植冠15公分，資料收集後並計算光譜反射比(特定波段的反射量/同波段的入射量)及反射光之近紅外光波段(790～890 nm)/紅光波段(610～680 nm)光譜輻射的比值。

輻射光譜測定同時，以紅外線熱像輻射儀(model 760, Inframetrics Inc., USA)，利用8～12μm的紅外線長波段對三種處理植株測量植冠溫度，經由影像處理，轉換爲高解析度的圖像(楊，1992)，予以收集熱像圖譜及建檔，再以電腦軟體ThermaGRAM (Thermoteknix System Ltd., Cambridge, England)分析所獲得資料，比較人工模擬酸雨處理、自來水處理及空白未處理之間的差異。

結果與討論

1. 光譜層析輻射儀的檢測

葉片是植冠主要構成單位，葉片解剖結構及生化組成關係著輻射光的吸收、穿透及反射。在健康的綠色葉片由於葉綠體及其他細胞色素(包括葉黃素、胡蘿蔔素及花青素等)對可見光(350～700 nm)的吸收，相對的反射或穿透的光輻射就很少了(Gausman, 1982; Maas and Dunlap, 1989)。被吸收的可見光轉化爲激發進行光合作用所需的電能及維持植體溫度的熱能，在高等植物，葉綠素a與葉綠素b爲吸收可見光波段最主要色素(達65%)，其吸收帶以藍光及紅光爲甚，而最大反射比波段介於黃綠光區(約550 nm)(楊，1996)。近紅外光波段區介於750～1350 nm，由於葉片色素及細胞壁纖維素(cellulose)對近紅外光幾乎透明，因此入射的光輻射絕大多數被反射或穿透。通常近紅外光波段區的反射比約爲50%，但受到細胞層厚薄、細胞大小、細胞壁排列方向及細胞內組成分等影響而改變(Walter-Shea *et al.*, 1991; 楊，1996)。

由圖1在落花生人工模擬酸雨處理第

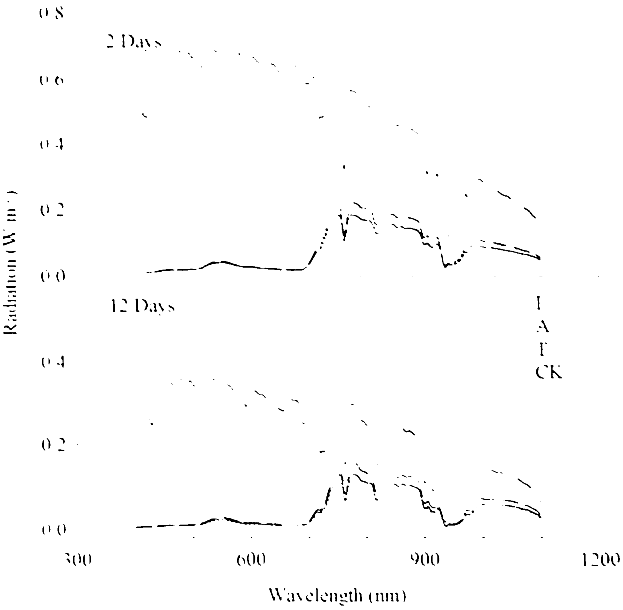

Fig. 1. Changes of the reflected radiation of peanut (*Arachis hypogaea* L.) under simulated acid rain and tape water treatments. I: incident solar radiation; A: simulated acid rain treatment; T: tape water treatment; CK: check.

2天及第12天的比較結果顯示，第2天的入射日射頻譜在400～1100 nm的範圍下最高點536 nm可達0.7 W m^{-2}，最低點則在936 nm的0.08 W m^{-2}左右；第12天的入射日射頻譜在同範圍的波長下，最高點536 nm尚不足0.4 W m^{-2}，最低點則在936 nm的0.02 W m^{-2}以下。顯示兩處理天當時天氣狀況並不一致，同時落花生反射輻射量也隨著入射日射量的高低而受影響。在2天及12天處理的比較，落花生三種處理的反射輻射量之間的差異，在可見光波段並無法區分，在近紅外光段皆以對照處理最高，但三者之間仍無明顯差別。

大豆人工模擬酸雨試驗，第1天及第5天的日射狀況類似，兩者的入射日射頻譜最高點概在480 nm之0.3 W m^{-2}，最低點則在936 nm之0.01 W m^{-2}(圖2)，同時在第1天處理的反射輻射量，人工模擬酸雨、自來水處理及未處理三者變化趨勢

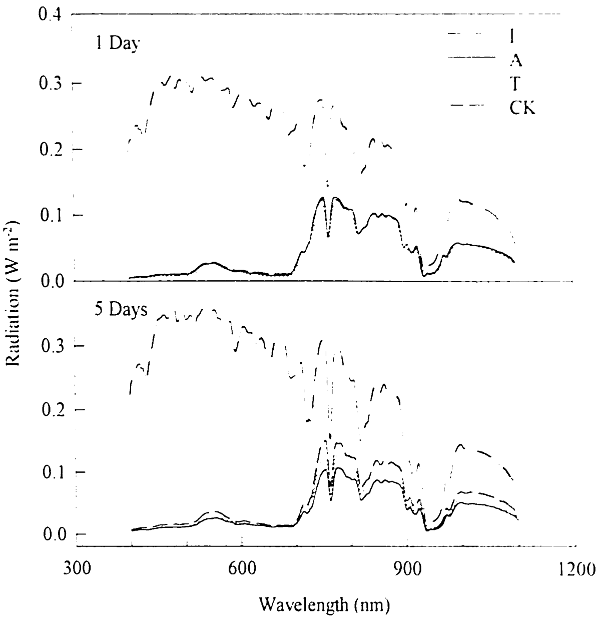

Fig. 2. Changes of the reflected radiation of soybean (*Glycine max* L.) under simulated acid rain and tape water treatments. I: incident solar radiation; A: simulated acid rain treatment; T: tape water treatment; CK: check.

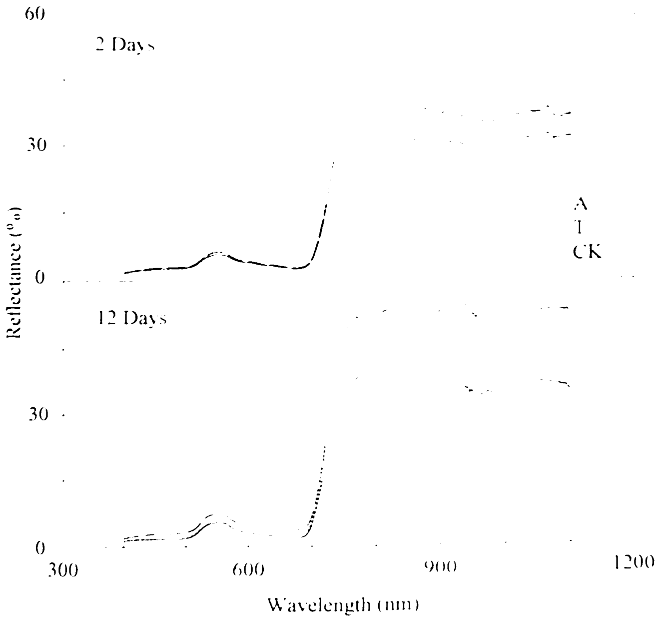

Fig. 3. Changes of the reflectance of peanut (*Arachis hypogaea* L.) under simulated acid rain and tape water treatments. A: simulated acid rain treatment; T: tape water treatment; CK: check.

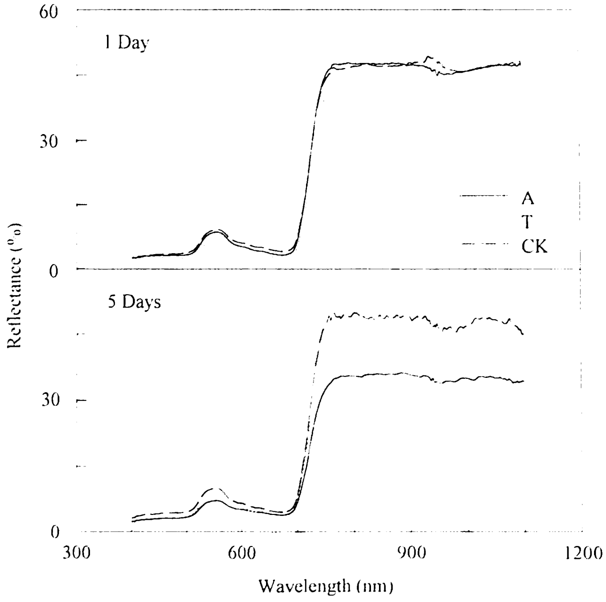

Fig. 4. Changes of the reflectance of soybean(*Glycine max* L.) under simulated acid rain and tape water treatments. A: simulated acid rain treatment; T: tape water treatment; CK: check.

一致性頗高，第5天的相異處則主要在於近紅外光波段，其中以未處理的植冠反射輻射量最高，自來水處理次之，人工模擬酸雨處理最低。

為了進一步區別兩種作物三種不同處理方式的輻射光譜差異，以反射比(reflectance)－所測得波段(400～1100 nm)的反射輻射量/同波段的入射日射量做為表徵作物生育的指標(Wooley, 1971; Daughtry *et al*., 1982; Walter-Shea *et al*., 1991)。落花生三種處理至第2天的差別在於近紅外光波段，以未處理最高，自來水處理次之，人工模擬酸雨處理最低，差距在3%範圍(圖3)。俟第12天後，三種處理在可見光波段稍許不同，然最大差別仍在於近紅外光波段，三者高低順序仍與第2天處理者相同，但彼此差距明顯擴大，兩兩處理間之範圍達7%。

大豆的反射比(圖4)在第1天只有自來水處理較低，尤其在近紅外光波段，相

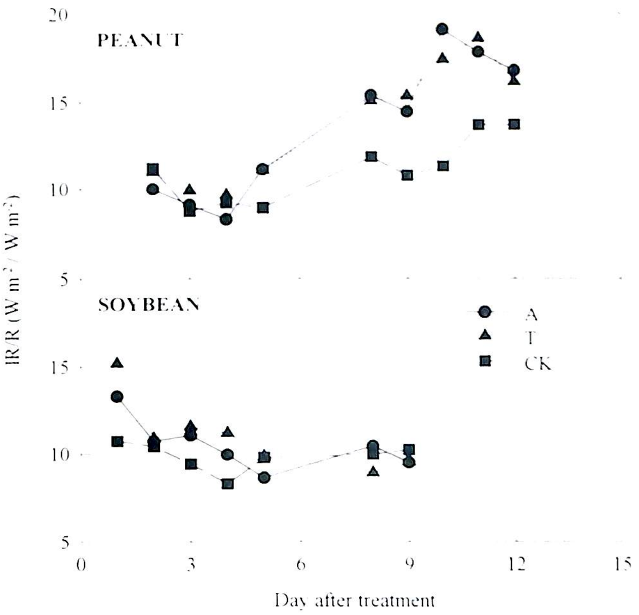

Fig. 5. Changes of the IR/R ratio of peanut (*Arachis hypogaea* L.) and soybean (*Glycine max* L.) under simulated acid rain and tape water treatments. IR: near infrared band (790-890 nm); R: red band (610-680 nm); A: simulated acid rain treatment; T: tape water treatment; CK: check.

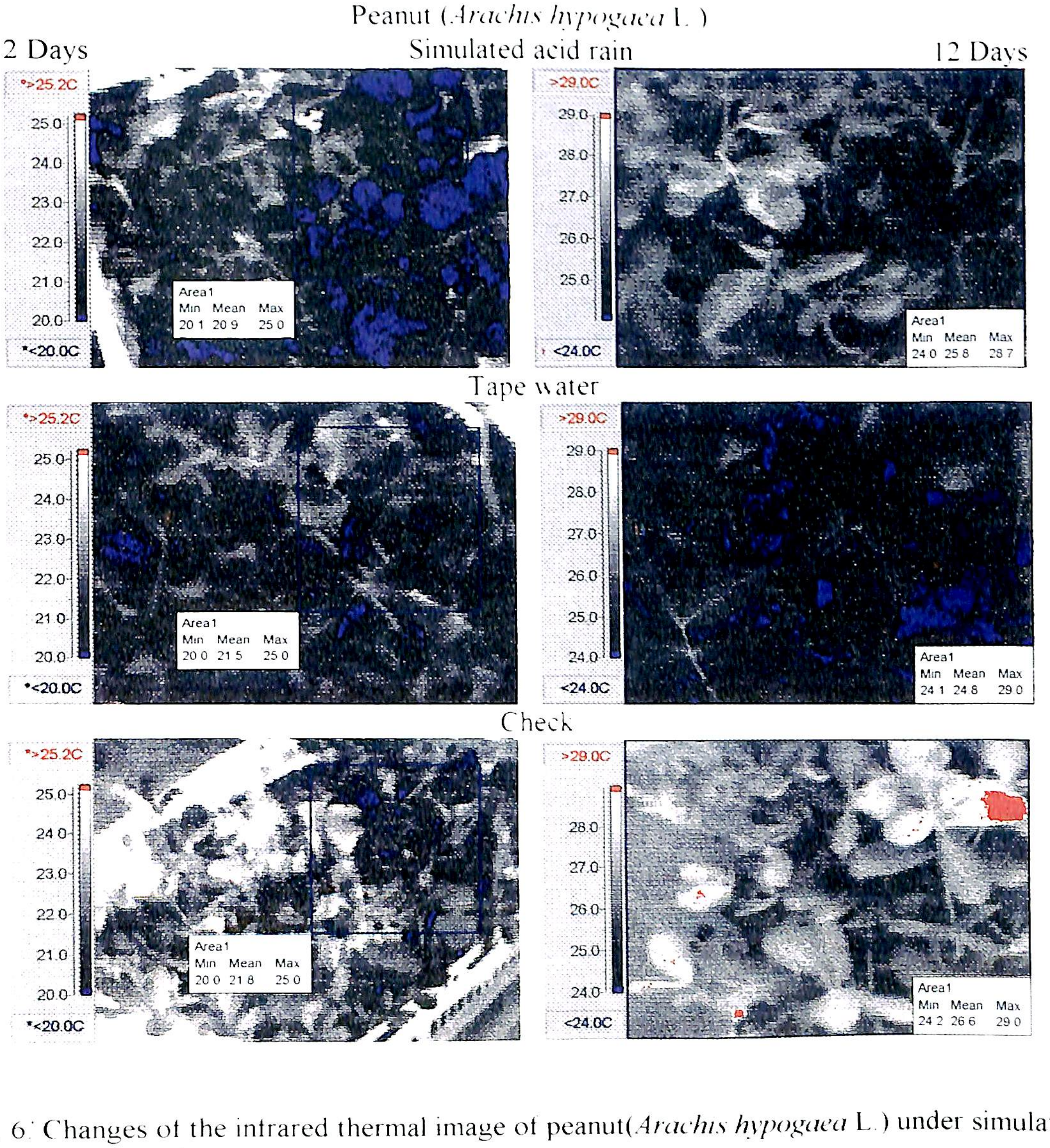

Fig. 6. Changes of the infrared thermal image of peanut(*Arachis hypogaea* L.) under simulated acid rain and tape water treatments

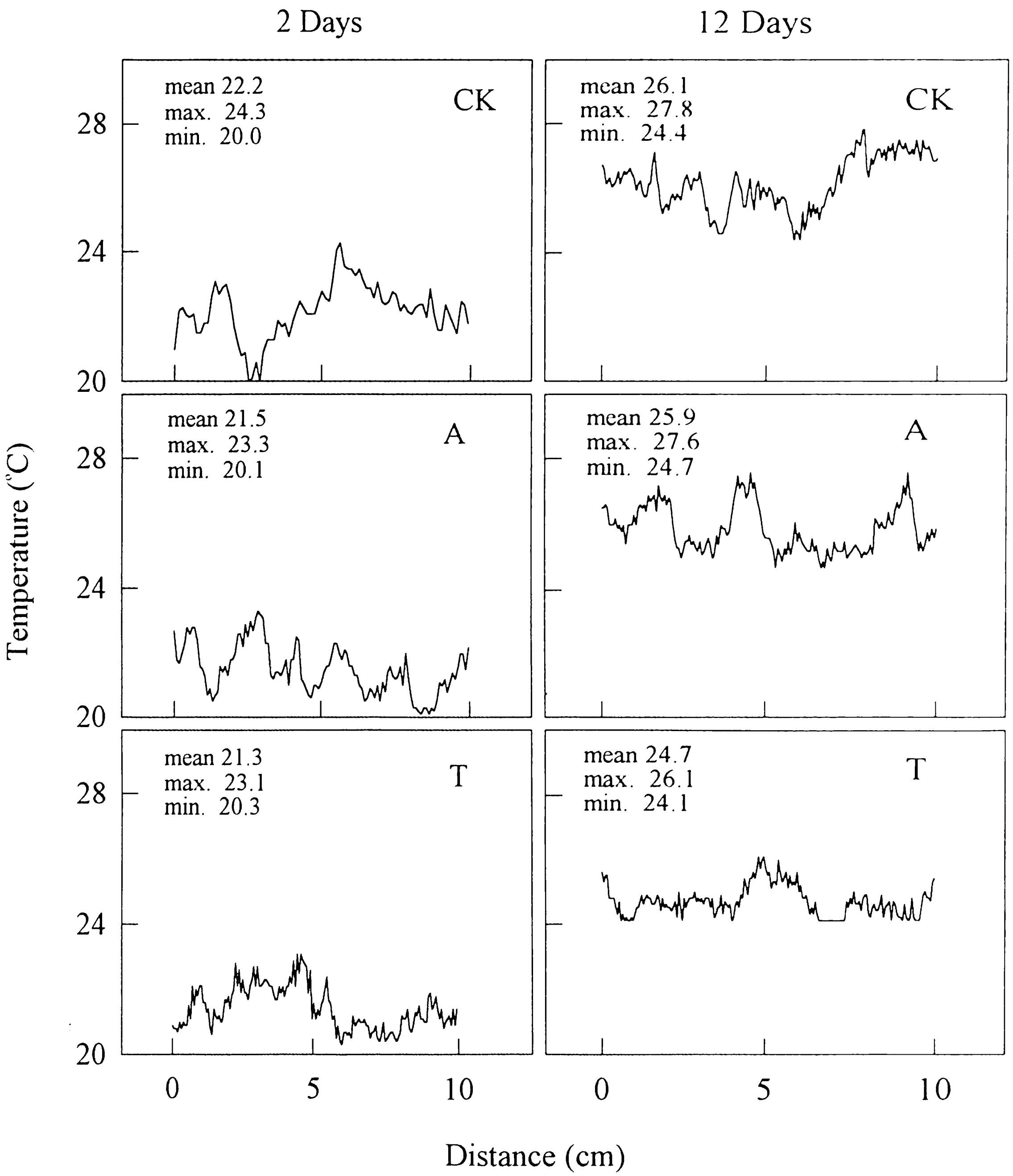

Fig. 7. Changes of temperature profile of peaunt (*Arachis hypogaea* L.) under simulated acid rain and tape water treatments. CK: check; A: simulated acid rain treatment; T: tape water treatment.

較於另外兩處理約低 4 %，此差別係由於盆栽生長差異所致。然而至第 5 天後，人工模擬酸雨處理之大豆植冠反射比最低，自來水處理次之，未處理最高，處理之間的差距範圍由可見光的 <1 % 至近紅外光段的 5 ～ 7 %，處理間排列次序與落花生者類似。

另外計算反射幅射量近紅外光波段 790 ～ 890 nm/ 紅光波段 610 ～ 680 nm 的比值 (李， 1995)，以探討兩者在各處

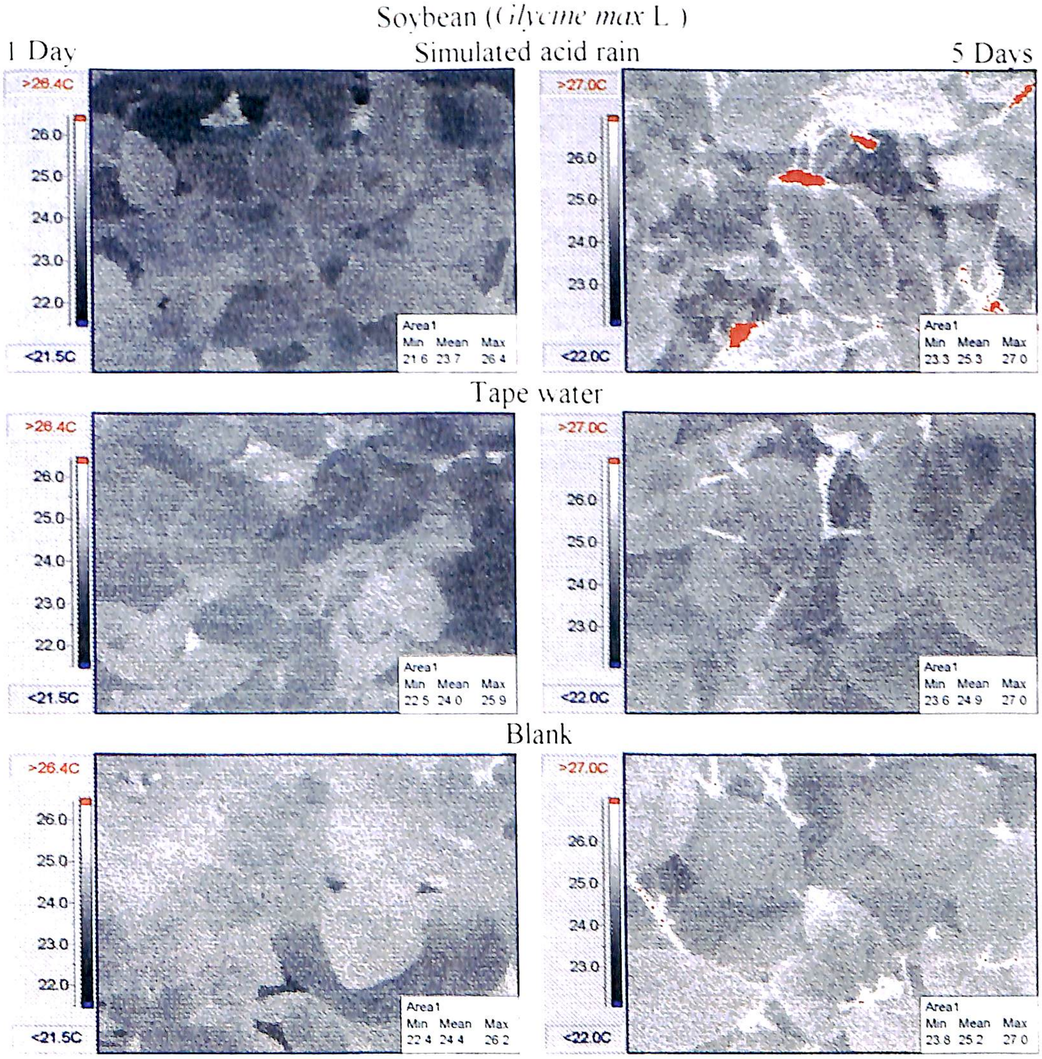

Fig. 8. Changes of the infrared thermal image of soybean (*Glycine max* L.) under simulated acid rain and tape water treatments.

理期間特定波段反射輻射量所佔的比例(圖 5)。落花生在處理至第 5 天之後，顯然人工模擬酸雨處理及自來水處理均有高於未處理的趨勢，但人工模擬酸雨與自來水處理之間的差距則不易區別，顯見在IR/R的比值上並無法區別本試驗落花生受酸雨危害與否之相異點，同時大豆在三種不同處理的 IR/R 比值，則呈現不一致的變化，亦即無法由IR/R比值來探討其差別。

在本試驗測定作物植冠反射光譜輻射特性時，有許多因素會造成干擾，例如當時天氣狀況(是否晴朗，有無雲的遮蔽)、植冠的立體結構(葉面積、葉片分布及葉齡等)、營養狀態及土壤水分等，其中又以天氣的變化對測定時的影響最大，選擇晴朗穩定的天氣測定是必要的，在收集光譜輻射資料之判斷時，也必須小心及加以注意的。

2. 紅外線熱像輻射儀之檢測

以紅外線熱像輻射儀檢測落花生人工模擬酸雨、自來水處理及未處理之間的差別(圖 6)，在第二天未處理之落花生植冠平均溫度 22.1 ℃，較人工模擬酸雨及自來水處理的植冠溫度(分別爲 21.0 及 21.2 ℃)

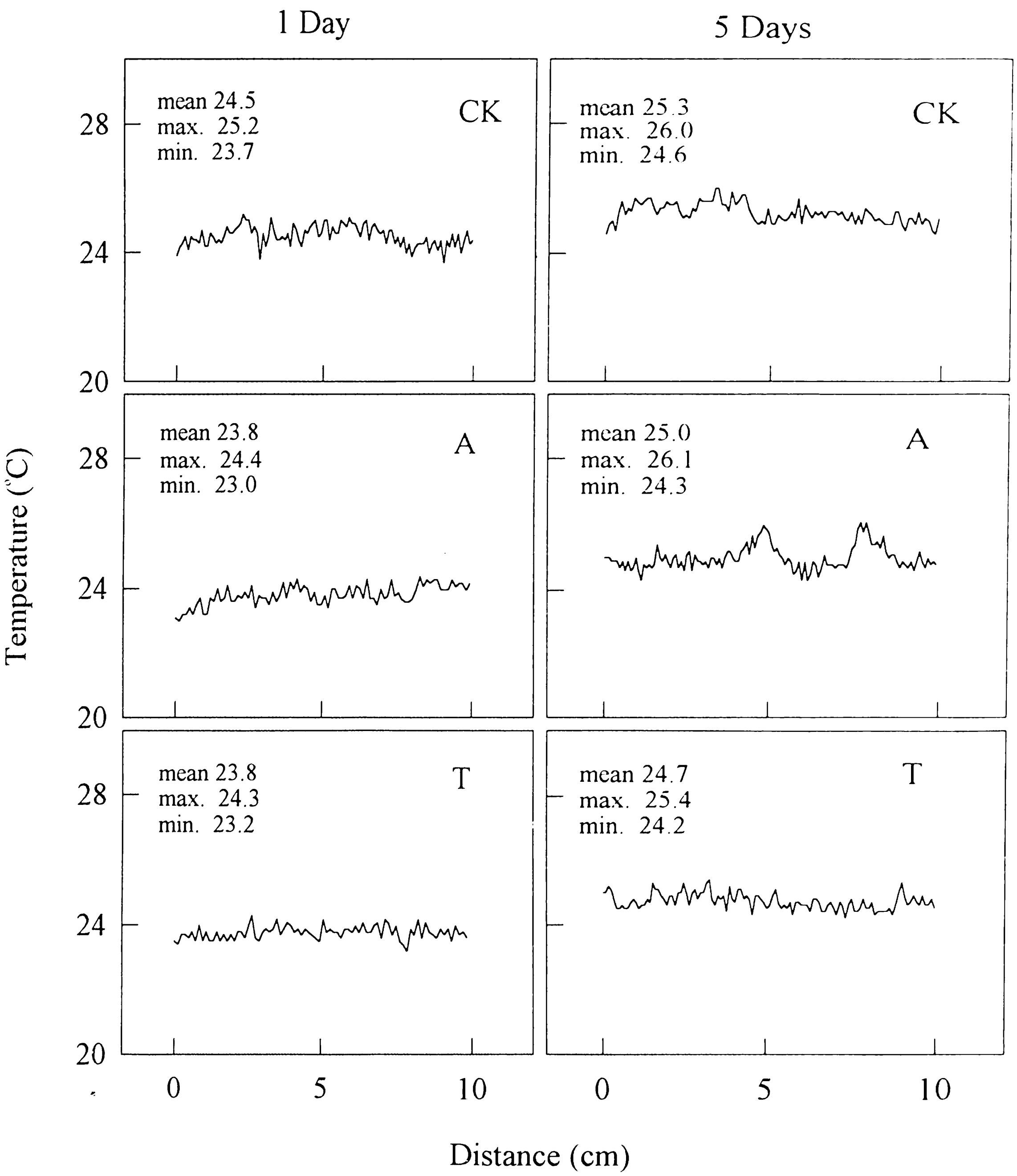

fig. 9. Changes of temperature profile of soybean (*Glycine max* L.) under simulated acid rain and tape water treatments. CK: check; A: simulated acid rain treatment; T: tape water treatment.

高約 1 ℃。這可能由於人工模擬酸雨及自來水處理經由 40 分鐘及大量水分淋洗，除了降低植株溫度外，也降低土壤溫度，並且大量的水分儲存於土壤中，都具有降溫的效果，反之未處理之落花生植冠及土壤皆未經淋洗，所以溫度較高。外在環境能量交換速率影響植被溫度，例如蒸發散作用即影響植冠溫度 (Fuchs, 1990)，因此在本試驗以人工模擬酸雨與自來水處理之間比較植冠溫度，似乎較為合理。在第 12

天未處理的落花生植冠溫度平均高達26.6 ℃，自來水處理平均溫度24.8 ℃，人工模擬酸雨處理的植冠平均溫度則為25.8 ℃。

又在落花生紅外線熱像影像視窗內，任意量取三種處理10 cm距離的剖面溫度變化(圖7)，第2天自來水處理剖面平均溫度21.3 ℃與人工模擬酸雨處理平均溫度21.5 ℃相近，且皆低於未處理植株溫度。但第12天人工模擬酸雨處理剖面平均溫度明顯提高至25.9 ℃，自來水處理者僅24.7 ℃，兩者平均溫度差距達1.2 ℃。顯然的，經過12天的人工模擬酸雨淋洗後，落花生植冠的日射反射性質已發生改變，而造成植冠溫度的上升。

大豆熱像結果(圖8)，在第1天三者處理之植冠溫度並不一致，其中人工模擬酸雨處理(植冠平均溫23.7 ℃)略低於自來水處理(植冠平均溫24.0 ℃)。在第5天大豆人工模擬酸雨處理的植冠溫度為25.3 ℃，高於自來水處理之24.9 ℃。同時在外觀徵狀上，經人工模擬酸雨處理至第5天，大豆葉片已經出現受害焦枯現象。

在大豆紅外線熱像影像視窗內，亦任意量取三種處理10 cm分距離的剖面溫度變化(圖9)。在第1天的取樣視窗，人工模擬酸雨與自來水處理的剖面平均溫度同為23.8 ℃；在第5天人工模擬酸雨處理平均溫為25.0 ℃，自來水處理為24.7 ℃，但此一結果僅是視窗上的任意10 cm，因此與視窗平均溫度略有差異，同時人工模擬酸雨處理剖面溫度變動較自來水處理幅度大，前者溫度變動幅度為1.7 ℃，後者僅1.1 ℃。

由上述處理結果，扣除大量水分淋洗對植體及土壤的降溫效果(利用自來水處理進行比較)，則兩種作物在酸雨處理下，植冠溫度確有升高效應，顯然酸雨淋洗過程中，酸性物質已對兩種作物的生理作用造成若干的改變。但是溫度升高的幅度隨著作物種類不同及處理天數而異，是否意味著溫度的上升與作物對酸雨敏感程度之間呈正相關頗值得深入探討。此外，酸雨對植體溫度改變的生理機制如何，影響溫度上升的原因是酸雨的pH值或酸雨組成分，這些都有待進一步的研究。

誌　謝

臺灣省農業試驗所研究報告第1839號。本文研究承臺灣省政府農林廳中美農業科技合作計畫經費支持，光譜偵測器由國立中興大學土壤環境科學系申雍教授慨借，謹此誌謝。

引用文獻

申雍　1996　遙感探測在農業上之應用。中華農業氣象學會簡訊　5(2):1-2。

李佩玲　1995　遙感探測技術於水稻乾旱及氟化物空氣污染逆境調查之應用。中興大學土壤學研究所碩士論文。pp.71。

姚銘輝、漆匡時、蔡金川　1996　模擬酸雨對落花生生理反應之影響。pp.156-168。農業氣象、空氣污染與酸雨對農業生產影響及因應措施研討會　楊純明(編)臺灣省農業試驗所　臺中。

楊純明　1992　紅外線熱像溫測技術之介紹。pp.109-113。農業氣象之研究法　楊純明等(編)　中華農業氣象學會　臺中。

楊純明　1996　作物植冠的光學特性及其應用。中華農業氣象學會簡訊　5(1):1-2。

Blum, A. 1980. Drought avoidance in wheat and its rapid estimation by remote infrared thermal leaf canopy measurements. In. Proc. 3rd Int. Wheat Conf., 22 may-3 June, Madrid, Spain.

Clawson, K. L. and B. L. Blad. 1982. Infrared thermometry for scheduling irrigations of corn. Agron. J. 74:311-316.

Daughtry, C. S., V. C. Vanderbilt and V. T. Pollara. 1982. Variability of reflectance measurements with sensor altitude and canopy type. Agron. J. 74: 744-751.

Dubay, D. T. and A. S. Heagle. 1987. The effects of simulated acid rain with and without ambient rain on the growth and yield of field-growth soybeans. Environ. Exp. Bot. 27:395-

401.
Evans, L. S. and T. M. Curry. 1979. Differential responses of plant foliage to simulated acid rain. Amer. J. Bot. 66:953-962.
Fuchs, M. 1990. Canopy thermal infrared observations. In: Instrumentation for studying vegetation canopies for remote sensing in optical and thermal infrared regions. (eds.) Goel, N. S. and J. M. Norman. pp. 323-330. Harwood Academic, U. K.
Gausman, H. W. 1982. Visible light reflectance, transmittance, and absorptance of differently pigmented cotton leafs. Remote Sens. Environ. 13:233-238.
Hatfield, J. L., A. Perrier and R. D. Jackson. 1983. Estimation of evapotranspiration at one time-of-day using remotely sensed surface temperature. Agric. Water Manage. 7:341-350.
Irving, P. M. and J. E. Miller. 1981. Productivity of field-grown soybeans exposed to acid rain and sulfur dioxide alone and in combination. J. Environ. Qual. 10:473-478.
Irving, P. M. 1983. Acidic precipitation effects on crops: A review and analysis of reserch. J. Environ. Qual. 12: 442-453.
Mass, S. J. and J. R. Dunlap. 1989. Reflectance, transmittance, and absorptance of light by normal, etiolated, and albino corn leaves. Agron. J. 81:105-110.
Muti, T. A., E. T. Kanemasu and C. Wassom. 1981. Canopy temperature, water use, and water use efficiency of corn genotype. Agron. J. 73:639-643.
Reddy, M. R. 1989. Acid precipitation effects on growth and yield responses of twenty soybean and twelve snap bean cultivars. J. Environ. Qual. 18: 145-148.
Smith, C. R., B. L. Vasilas, W. L. Banwart and W. M. Walker. 1991. Physiological response of two soybean cultivars to simulated acid rain. New Phytol. 119:53-60.
Walter-Shea, E. A., J. M. Norman, B. L. Bland and B. F. Robinson. 1991. Leaf reflectance and transmittance in soybean and corn. Agron. J. 83:631-636.
Woolley, J. T. 1971. Reflectance and transmittance of light by leaves. Plant Physiol. 47:656-662.